

지중배전 케이블의 노화에 의한 가교도 특성

이우선* · 조준호* · 최권우* · 정창수** · 정용호*** · 김상용****
*조선대학교, **한국전력공사, 서강정보대***아남반도체

Crosslinked Characteristics of XLPE Cables by Aging

Woo-Sun Lee* · Jun-Ho Cho* · Chang-Soo Chung** · Yong Ho Chung***, Sang-Youg Kim****
* Chosun Univ., ** KEPCO, ***ANAM Semiconductor

Abstract-This study refers to the crosslinked characteristics of XLPE cables by aging. The cable failure brings about an enormous loss of power supply and the immense expense for cable replacement. These characterization techniques can be used for identifying a cause of failure and for improving a quality of equipments. Also, these play an important role in the detection of premature failure.

In order to maintain a cable reliability, quality control is needed strictly. It can be possible to estimate a residual lifetime of power cable using characterization techniques.

도 특성분석을 통하여 전력케이블에 대한 수명을 예측함으로써 사고케이블을 적기 교체, 전력공급의 신뢰성을 향상시키고자 한다.

2. 특성 분석기술

2.1 시료채취 및 가공

지중 배전케이블에서 사고가 발생하면 사고 부위로부터 30 cm 이내를 채취한 후 그림 1에 나와 있는 것처럼 선반을 이용하여 실험에 적당한 형태로 가공한다.

1. 서 론

저밀도 폴리에틸렌(low density polyethylene: LDPE)보다 열적, 기계적 특성이 우수한 가교 폴리에틸렌 (crosslinked polyethylene: XLPE)으로 절연된 지중배전용 전력케이블도 고분자의 특성상 경년에 따라 열화되기는 마찬가지이므로 열화에 의한 사고는 불가피하다.

그러나 국내의 경우에는 케이블의 예상수명으로 알려진 30년에 훨씬 못 미치는 8~12년 정도에서 사고가 빈번하게 발생하고 있으며, 이러한 사고발생은 계속적으로 증가하는 추세이다. 전력케이블의 사고는 취약한 결합부분에서 발생하는 것이 당연하지만 일단 사고가 발생하면 사고원인인 결합부분이 소실되므로 정확한 원인을 규명하기가 매우 어렵다.

전력케이블의 사고 원인으로는 크게 시공불량, 제조결함, 자연열화 등으로 구분하여 생각할 수 있다. 시공불량에 의한 사고로는 풀링작업시 발생할 수 있는 시스 (sheath) 손상, 케이블 접속을 위한 외부 반도체층 제거시 발생할 수 있는 절연층 손상 및 이물질 유입, 허용 곡률반경을 초과한 무리한 시공 등이 있다.

본 연구에서는 이러한 전력케이블의 화학결합과 가교

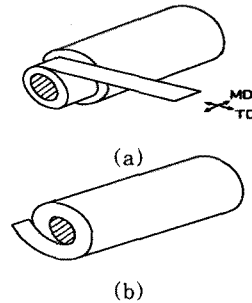


Fig. 1 Processing of cable specimens (a) Ribbon specimen, (b) Coil specimen

2.2 특성분석 기술

Hot oil test는 넓은 면적의 케이블 절연층을 검사할 수 있지만, 결합에 대한 직접적인 측정방법으로는 불완전하다. 그러므로 필요하다면 결합의 위치를 확인하고 케이블 표면에 표시한 다음 문제가 있는 부분을 절단하여 현미경에서 정밀한 분석을 하는 것이 바람직하다. 또한 절연층이 투명해지기 때문에 내부 반도체층의 불규칙성도 확인할 수 있다. 내부 반도체층의 평활성은 케이블의 트리밍 (treeing) 현상과 사고를 유발하는 고전계를 억제하는 역할을 하므로 매우 중요하다⁹⁾.

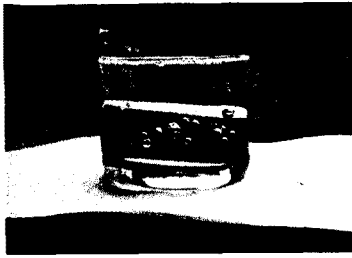
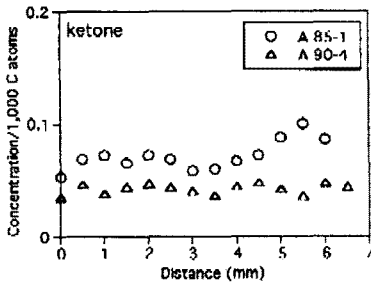


Fig. 2 Void of failed cable

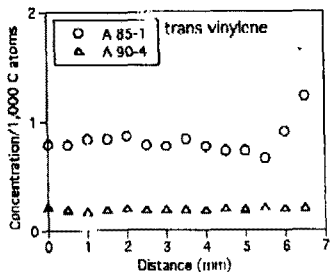
그림 2는 현장에서 10년이상 운전중 수트리에 의한 절연층 열화로 사고가 발생한 국내의 케이블을 Hot oil test한 결과로서 절연체 내부에 많은 보이드가 존재하였고 실험결과 수트리가 발생한 위치와 보이드가 발생한 위치가 일치하는 결과를 얻었다. 이는 절연층 내부의 보이드가 수트리의 발생에 영향을 미쳤다고 판단된다. 위의 케이블을 상온에서 냉각한 후 코일형태로 가공하여 관찰한 결과 케이블 내부에 빈 공간을 존재함을 확인하였다.

(3) 절연층의 화학구조결합 분석

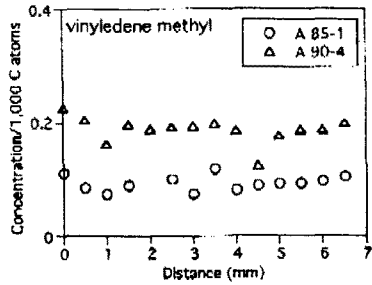
그림 3에서 알 수 있는 것처럼 화학결합의 농도가 절연층의 두께방향으로 일정한 값을 나타내는 것이 아니라 절연층의 두께방향으로 분포도를 나타낸다. 이러한 사실은 어느 한 부분의 측정치가 그 케이블 전체의 특성을 대표할 수 없음을 의미하는 것이다.



(a) ketone



(b) trans vinylene



(c) vinylidene methyl

Fig. 3 Typical profile of unsaturation

그림 3는 불포화 탄화수소 결합 성분에 대한 85년도 제품과 90년도 제품을 비교한 결과이다. (a)는 ketone성분으로 85년도 제품은 각 측정 지점별로 불균등한 분포를 보이나 90년도 제품은 각 측정 지점별로 균등한 분포를 보였다. (b)에 나타나는 trans vinylene 성분 또한 ketone과 비슷한 분포형태를 보였으나 특히 85년도 제품의 외부 반도체층 부근에서 현격한 증가율을 보였다.

그러나, (c)의 vinylidene methyl 분포도는 반대경향을 보였다. 이러한 사실은 케이블의 어느 한 부분에서의 화학구조분석결과가 그 케이블 전체의 특성을 대표할 수 없다는 것을 다시 한번 확인하였다.

(4) 절연층의 가교도 분석

예전에는 전력케이블의 절연층으로 저밀도 폴리에틸렌을 사용하기도 하였으나, 가교된 폴리에틸렌이 수트리에 대한 저항성이 더 크다는 사실이 밝혀진 후 본격적으로 사용되기 시작하였다. 이러한 가교 폴리에틸렌은 비교적 간단한 화학가교에 의해 제조할 수 있으며, 저밀도 폴리에틸렌에 비교하여 기계적, 열적, 전기적 특성이 우수하다. 만약 가교가 제대로 되어 있지 않으면 각종 열화반응에 대한 저항성이 감소되기 때문에 전력케이블은 항상 일정 수준 이상, 일반적으로 80% 이상의 가교도를 유지해야 한다.

일반적으로 가교도의 측정방법은 리본 형태로 가공한 케이블 시료로부터 일정한 두께간격으로 시료를 취한 다음 140℃의 xylene속에서 24시간 추출하여 아래의 식에 의거 계산한다.

$$\text{가교도}(\%) = \frac{\text{xylene에 끓인 후남아있는 무게}}{\text{xylene에 끓이기 전의 무게}} \times 100$$

가교도의 측정시 주의할 점은 무게 측정에 세심한 주의를 기울여야 한다는 것이다. 그러므로 시료내에 남을 수 있는 잔류용매를 완전히 제거해야 하며, 시료를 담

는 wire mesh도 알맞게 선정하여 추출 도중 떨어진 가교 폴리에틸렌 조각이 빠져 나가지 않도록 해야 한다. 그러므로 약 120~150 mesh 정도의 wire mesh가 적당하다.

그림 4은 현장에서 10년 이상 운전중 사고가 발생한 케이블을 대상으로 가교도를 측정한 결과로서 대표적인 가교도 분포도이다. 가교도 역시 두께방향으로 분포를 나타내고 있으며, 일부 케이블에서는 비정상적인 가교도 분포가 나타났다.

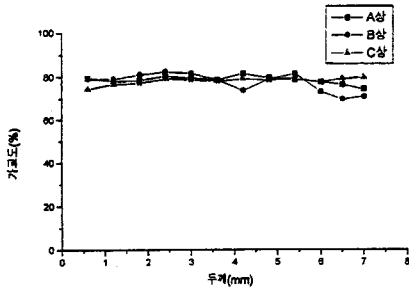


Fig 4. Typical profile of crosslinking density

이러한 미가교된 부분은 케이블의 수명에 매우 나쁜 영향을 미치므로 주의해야 한다

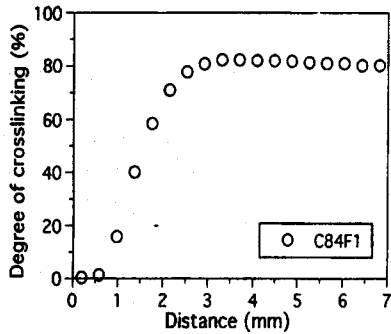


Fig.5 Example of abrupt decrease in crosslinking density

3. 결 론

이상과 같이 전력케이블에 관련된 국내의 특성분석 기술에 대하여 언급한 결과 다음과 같이 주요한 결론을 얻었다.

1). 반도체층에 높은 함량의 불순물이 존재하고 있었으며, 절연층/외부반도체층의 계면에서 탄화된 이물질이 검출되었으며 사고가 발생한 케이블을 분석한 결과 외부반도체층으로부터 성장한 수트리가 절연층 전체에 걸쳐 나타났다.

2). 화학결합의 농도가 절연층의 두께방향으로 일정한 값을 나타내는 것이 아니라 절연층의 두께방향으로 분포도를 나타내었음을 확인 하였다.

3). Ketone성분의 상대적으로 적은 85년도 제품은 각 측정 지점별로 불균등한 분포를 보이나 90년도 제품은 각 측정 지점별로 균등한 분포를 보였다.

4). 가교도 증진을 위하여 시료를 담은 wire mesh를 선정한 결과 가교 폴리에틸렌 의 매쉬는 120~150 mesh 였다.

이러한 불순물의 영향을 감소시키기 위해서는 특별한 기술이 필요한 것이 아니라 원재료 제조시 또는 케이블 제조시 불순물이 유입되지 않도록 주의하고 불순물의 함량을 규제할 수 있는 방법을 이용한다면 국내 배전케이블의 성능도 크게 향상될 것으로 기대된다. 또한 분석시 종종 발견되는 보이드나 미가교, convolution 같은 결함 등은 케이블의 성능을 좌우하는 중요한 특성이므로 제조시에 엄격하게 관리되어야 할 것이다.

참고문헌

1. 한국전력, "22.9 kV 동심중성선 전력케이블", ES 126-640~647, 1995.
2. AEIC, "Specification for Cross-linked Polyethylene Insulated Shielded Power Cables Rated 5 through 46 kV", AEIC CS5-94, 1994.
3. A. C. Ashcraft, R. M. Eichhorn, "Method for Visualization of Water Trees by Staining", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-13, pp. 198-199, 1978.
4. E. F. Steennis, F. H. Kreuger, "Water Treeing in Polyethylene Cables", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. 25, pp. 989-1028, 1990.
5. 전력연구원, "배전케이블 수명예측 기준결정 및 열화 진단 시스템 구축" 최종보고서
6. 한재홍, 서광석, 김상준, "에틸렌비닐아세테이트/에틸렌계 공중합체 블렌드의 이온 투과 및 물리적 성질", 전기학회지, Vol. 45, 1996.